

# ダブルスリットを用いた干渉計による発光ダイオードの空間的コヒーレンスの評価

山本 裕紹・野上 豊史・早崎 芳夫・西田 信夫

徳島大学工学部光応用工学科 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

## Evaluation of Spatial Coherence of Light Emitting Diode Using an Interferometer with a Double Slit

Hirotsugu YAMAMOTO, Toyoshi NOGAMI, Yoshio HAYASAKI and Nobuo NISHIDA

Department of Optical Science and Technology, Faculty of Engineering, University of Tokushima, 2-1, Minamijosanjima-cho, Tokushima 770-8506

The purpose of our research is to quantitatively compare light emitting diode (LED)'s properties of radiation and those of laser diode (LD), and He-Ne laser in order to reconsider the LED's international standard for eye safety. Spatial coherence, on which the maximum power density on the focal plane depends, is evaluated by using the visibility of the interference fringes from double slits as the index of spatial coherence of a light source. Formulas expressing the double slit interference intensity distribution of partially coherent light are derived. Compensation of diffraction envelope to obtain the degree of coherence is introduced. Using LED, LD, and He-Ne laser, experiments were carried out. Experimental results revealed the quantitative difference of spatial coherence of the LED and the LD.

**Key words:** light emitting diode (LED), laser diode (LD), spatial coherence, double slit, safety standards

### 1. はじめに

発光ダイオード (LED) の高性能化が進み、高出力のもので登場したことを背景に、すべての LED および LED 利用機器を従来はレーザー光を対象にしていた安全性の国際規格<sup>1)</sup>に含める規格化がヨーロッパを中心に進行中である<sup>2)</sup>。この規格案ではレーザー光と同じ測定方法で LED の光を評価するため、LED 光源に対しては過剰に危険度を設定することになり、LED の用途が制限される恐れがある。

レーザー光と LED 光とでは、時間的・空間的コヒーレンスに違いがある。LED 光源の出力光がインコヒーレントである場合には集光性が悪いため、出力光がコヒーレントで集光パワー密度が相乗的に増加するガスレーザー光源や半導体レーザー (LD) 光源に比べて、より安全であると考えられる。LED の時間的コヒーレンスについてはスペクトルの測定により定量化できる。LED の空間的コヒーレンスについての定量化が必要である。

光源が完全にインコヒーレントである場合には、van Cittert-Zernike の定理により、光強度分布のフーリエ変換から光源のコヒーレンス関数を求めることができる<sup>3)</sup>。しかしながら、光源のコヒーレンスについての情報なしに、光源のコヒーレンス度を評価するためには、干渉実験を行う必要があり、例えばケスタープリズムを用いる方法<sup>4)</sup>、マイケルソン天体干渉計を応用する方法<sup>5-7)</sup>、マッハ・ツェンダー干渉計を応用する方法<sup>8)</sup>、2本の光ファイバーを用いる方法<sup>9)</sup>があるが、LED の空間的コヒーレンスに関するデータは、筆者らの知る限り、まったく報告されていない。

LED をレーザー光源と同一に扱う安全規格案の見直しのためには、LED と LD の空間的コヒーレンスの差異を定量的に示す必要がある。そのため、LED と LD の両方を評価できる光学系を採用する必要がある。LED 光源からファーストフィールドの領域においては、LED の発光部の形状がコヒーレンス度を決定するため、その結果で LED と LD の

E-mail: yamamoto@opt.tokushima-u.ac.jp

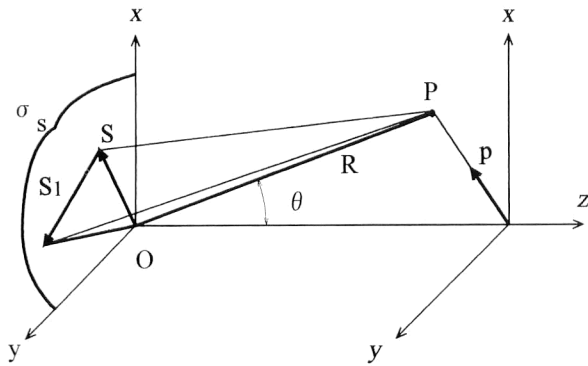


Fig.1 Coordinate system between aperture plane and diffraction plane.

差異を論じるには適していない。そこで、光源のニアフィールドでの空間的コヒーレンスを評価することにした。

LEDのコヒーレンス関数の広がりや光源の大きさに比べてきわめて狭いと予想されるため、発光面上の微小領域をダブルスリット上に拡大結像して、光源上で近接する中心間隔をもつダブルスリットの領域からの放出光による干渉縞を形成する光学系を採用して、干渉縞からコヒーレンス度を評価する。測定された干渉縞強度分布は、ダブルスリット間隔に由来する干渉と、スリット開口の幅に由来する回折の両方の効果を含むため、干渉性による強度分布を得るために、回折の効果を補正した後、干渉縞の鮮明度からコヒーレンス度を求める。

本論文では、第2章で、部分的コヒーレント光源の回折理論<sup>10-15)</sup>に基づいて、ダブルスリットによる干渉縞強度分布の式を導出し、回折の効果の補正方法を示す。第3章で、LEDのコヒーレンス関数とレーザー光源の測定結果を比較する。

## 2. ダブルスリットを用いた空間的コヒーレンスの測定

朝倉ら<sup>10-15)</sup>による部分的コヒーレント光の回折光強度分布の導出法に基づいてダブルスリットによる回折光強度分布を表す式を導出する。部分的コヒーレント光源の回折現象について、Fig. 1に示すような平面開口と回折領域の関係で考える。平面開口上でコヒーレンス関数が位置不変であるとき、フラウンホーファー領域にある点Pにおける回折光の強度  $I(\mathbf{P})$  は、開口上のコヒーレンス関数  $\gamma(\mathbf{S})$ 、光源の平均波長  $\bar{\lambda}$ 、波数  $\bar{k}$ 、点Pの方向を示す単位ベクトル  $\mathbf{p}$ 、開口から点Pまでの距離  $R$ 、開口から点Pの方向を示す角  $\theta$  を用いて、

$$I(\mathbf{P}) = \left( \frac{\cos\theta}{\bar{\lambda}R} \right)^2 \int_{\sigma_s} \gamma(\mathbf{S}) C(\mathbf{S}) \exp(i\bar{k}\mathbf{p}\cdot\mathbf{S}\sin\theta) d\mathbf{S} \quad (1)$$

と表される<sup>10)</sup>。ここで、

$$C(\mathbf{S}) = \int_{\sigma_1} \sqrt{I(\mathbf{S})} \sqrt{I(\mathbf{S}+\mathbf{S}_1)} d\mathbf{S}_1 \quad (2)$$

であり、これは、開口上における光の振幅分布の自己相関関数である。

近軸領域で考えるとき、 $\sin\theta \approx \theta$ 、 $\cos\theta \approx 1$ 、 $1/R$  は一定と近似できるので、 $A$  を定数として、式(1)は

$$I(\mathbf{P}) = A \int_{\sigma_s} \gamma(\mathbf{S}) C(\mathbf{S}) \exp(i\bar{k}\mathbf{p}\cdot\mathbf{S}\theta) d\mathbf{S} \quad (3)$$

と表される。

したがって、ダブルスリットによる回折光強度分布は、式(3)の積分を1次元で考えて、

$$I(P) = A \int_{\sigma_s} \gamma(\rho') C(\rho') \exp(i\bar{k}\theta\rho') d\rho' \quad (4)$$

ただし、

$$C(\rho') = \int_{\sigma_1} \sqrt{I(x)} \sqrt{I(x+\rho')} dx \quad (5)$$

で表される。

ダブルスリット開口上で光強度が均一であるとする、開口上での光強度を  $I(x) = I(x+\rho') = 1$  とおくことができる。ダブルスリットの開口幅を  $2W'$ 、中心間隔を  $2D'$  とするとき、式(5)で示される開口上の自己相関関数は、 $0 < W' \leq D'/2$  のとき

$$C(\rho') = \begin{cases} 2(2W' - |\rho'|) & 0 \leq |\rho'| \leq 2W' \text{ のとき} \\ 2W' - 2D' + |\rho'| & 2D' - 2W' \leq |\rho'| \leq 2D' \text{ のとき} \\ 2W' + 2D' - |\rho'| & 2D' < |\rho'| \leq 2D' + 2W' \text{ のとき} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (6)$$

と表され、 $D'/2 < W' \leq D'$  のとき

$$C(\rho') = \begin{cases} 2(2W' - |\rho'|) & 0 \leq |\rho'| \leq 2D' - 2W' \text{ のとき} \\ 6W' - 2D' - |\rho'| & 2D' - 2W' < |\rho'| \leq 2W' \text{ のとき} \\ 2W' - 2D' + |\rho'| & 2W' < |\rho'| \leq 2D' \text{ のとき} \\ 2W' + 2D' - |\rho'| & 2D' < |\rho'| \leq 2D' + 2W' \text{ のとき} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (7)$$

と表される。コヒーレンスを測定する目的には、ダブルスリットの開口の幅をダブルスリットの中心間隔に比べて狭くするほうが望ましいため、以下、 $0 < W' \leq D'/2$  の場合について考えることにすると、ダブルスリットによる干渉縞の強度分布は、

$$I(P) = 2A \int_0^{2W'} \gamma(\rho') 2(2W' - \rho') \cos(\bar{k}\theta\rho') d\rho' + 2A \int_{2D'-2W'}^{2D'} \gamma(\rho') (2W' - 2D' + \rho') \cos(\bar{k}\theta\rho') d\rho'$$

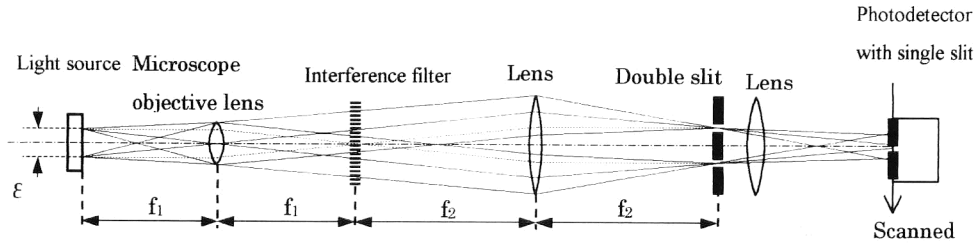


Fig. 2 Schematic view of the double slit interferometer.

$$+2A \int_{2D'}^{2D'+2W'} \gamma(\rho') (2W' + 2D' - \rho') \cos(\bar{k}\theta\rho') d\rho' \quad (8)$$

と表される。ここで、式(8)の各項の積分領域を簡単にするために  $D = D'/W'$ ,  $\rho = \rho'/W'$  を用いて積分変数の変換を行い、ダブルスリットによる干渉縞の光強度分布を

$$\begin{aligned} I(P) = & 4W'^2 A \int_0^2 \gamma(W'\rho) 2(1-\rho/2) \cos(\bar{k}\theta W'\rho) d\rho \\ & + 4W'^2 A \int_0^2 \gamma(W'\rho + 2W'D - 2W') (\rho/2) \\ & \times \cos(\bar{k}\theta W'\rho + 2\bar{k}\theta W'D - 2\bar{k}\theta W') d\rho \\ & + 4W'^2 A \int_0^2 \gamma(W'\rho + 2W'D) (1-\rho/2) \\ & \times \cos(\bar{k}\theta W'\rho + 2\bar{k}\theta W'D) d\rho \quad (9) \end{aligned}$$

と表すことができる。

ダブルスリットの開口幅の範囲内 ( $0 \leq |\rho| \leq 2$ ) でコヒーレンス関数の変化が緩やかと仮定して、 $0 \leq \rho \leq 2$  の範囲で  $\gamma(W'\rho) = \gamma_0$ ,  $2D - 2 \leq |\rho| \leq 2D + 2$  の範囲で  $\gamma(W'\rho) = \gamma_{2D}$  と近似すると、干渉縞の強度分布は、

$$\begin{aligned} I(P) = & 8W'^2 A \left\{ \frac{\sin(\bar{k}\theta W')}{\bar{k}\theta W'} \right\}^2 \\ & \times \{ \gamma_0 + \gamma_{2D} \cos(2\bar{k}\theta W'D) \} \quad (10) \end{aligned}$$

と表される。 $\{ \sin(\bar{k}\theta W') / (\bar{k}\theta W') \}^2$  の項は幅  $2W'$  の単スリットによる回折の強度分布と一致し、後半の  $\{ \gamma_0 + \gamma_{2D} \cos(2\bar{k}\theta W'D) \}$  の項が干渉の強度分布である。単スリットによる回折の影響を補正した干渉縞強度分布の最大値を  $I_{\max}$ , 最小値を  $I_{\min}$  として、ビジビリティ  $V_{2D}$  を

$$V_{2D} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (11)$$

により求めると、

$$V_{2D} = \frac{\gamma_{2D}}{\gamma_0} \quad (12)$$

が得られる。スリットの幅の範囲内でコヒーレント ( $\gamma_0 \doteq 1$ ) であると近似すると、

$$V_{2D} = \gamma_{2D} \quad (13)$$

が得られる。つまり、単スリットによる回折の影響を補正した後、得られた干渉成分の強度分布のビジビリティからコヒーレンス度  $\gamma_{2D}$  を算出することができる。

### 3. 実験

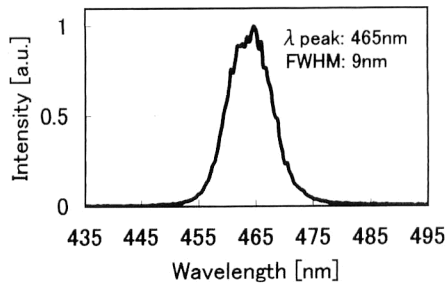
LEDの空間的コヒーレンスを測定するために、Fig. 2に示すように拡大結像光学系とダブルスリットからなる干渉計を用いた。顕微鏡対物レンズ (ニコン CFI Plan Fluor ELWD 40×C) とアクロマティックレンズからなるテレセントリックの拡大結像光学系を用いて光源の発光部をダブルスリット上に結像した。ダブルスリットから出射される光をレンズで集光し、焦点面上に形成される干渉縞を幅  $10 \mu\text{m}$  の単スリットを取り付けたフォトダイオードで走査することにより、ダブルスリットにより形成される干渉縞の強度分布を測定した。

ダブルスリットには、幅  $10 \mu\text{m}$ 、長さ  $3 \text{mm}$  で、中心間隔がそれぞれ  $23 \mu\text{m}$ ,  $28 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$ ,  $40 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$  の5種類のスリットを用いた。拡大結像光学系の倍率 (50倍) より光源上に換算したダブルスリットの中心間隔は、それぞれ、 $0.46 \mu\text{m}$ ,  $0.56 \mu\text{m}$ ,  $0.60 \mu\text{m}$ ,  $0.80 \mu\text{m}$ ,  $1.0 \mu\text{m}$  である。

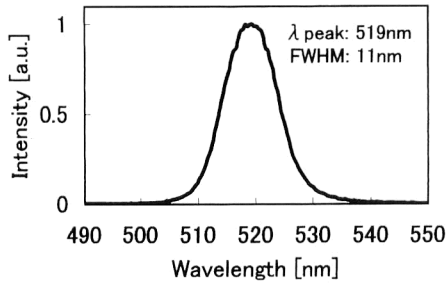
LEDの空間的コヒーレンスをコヒーレント光源とみなされているレーザー光源と比較するために、LD, He-Neレーザーについても測定を行った。実験にはステムパッケージ (レンズなし) のLEDを使用した。実験に用いたLEDは日亜化学製 zNSHR 550 E, zNSHG 550 E, zNSHB 550 E, LDは東芝製 TOLD 9215, He-Neレーザーはオーテックス製 1137 p-3071 である。He-Neレーザーを光源に用いる場合には、レーザーのビーム径を広げた後、ダブルスリットで選択される領域の干渉性を測定することになる。

LEDの空間的コヒーレンスを測定する場合には、スペクトル幅による鮮明度の低下を抑えるために、干渉フィルター (日本真空光学 DIF-BP-2λ 520, DIF-BP-2λ 465, シグマ光機 VPF-25 C-03-45-63280) を用いて測定を行った。ダブルスリット面上でスペクトル分布を測定した結果をFig. 3に示す。青色LEDの場合、ピーク波長  $465 \text{nm}$ , FWHM  $9 \text{nm}$  であり、緑色LEDの場合、ピーク波長  $519 \text{nm}$ , FWHM  $11 \text{nm}$ , 赤色LEDの場合、ピーク波長  $633 \text{nm}$ , FWHM  $3 \text{nm}$  に帯域制限することができた。

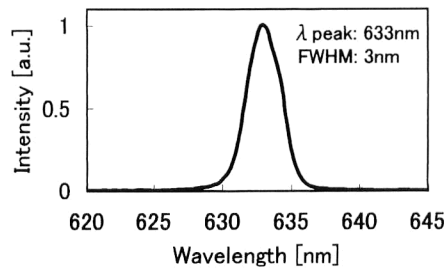
中心間隔  $30 \mu\text{m}$  のダブルスリットを用いて得られた干



(a)

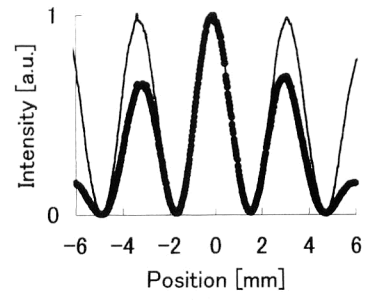


(b)

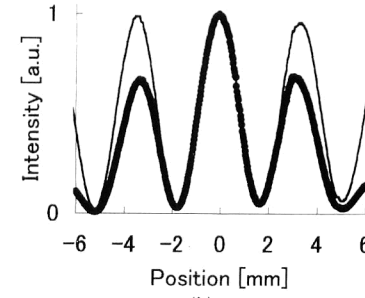


(c)

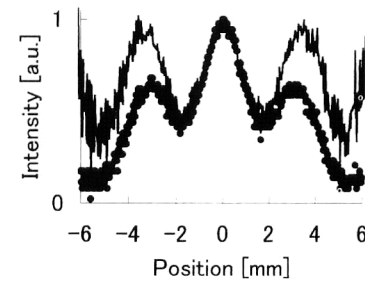
Fig. 3 Spectrum in the double slit plane. (a) Spectrum of blue LED with blue interference filter, (b) spectrum of green LED with green interference filter, and (c) spectrum of red LED with red interference filter. Each peak wavelength and FWHM is written in the graph.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Interference intensity distributions diffraction using a double slit ( $30 \mu\text{m}$  apart from center to center.  $10 \mu\text{m}$  width aperture). Dots: measured intensity distribution. Solid line: Interference distribution obtained by correction of diffraction effect. (a) He-Ne laser, (b) laser diode, and (c) red light emitting diode with interference filter.

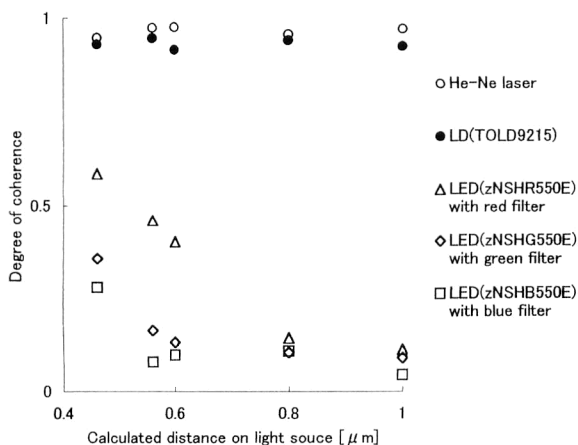


Fig. 5 Relations between the calculated distance of the double slit on the light source and the degree of coherence.

渉縞の光強度分布ならびにスリットの開口幅による回折を補正して得られた干渉成分の強度分布を Fig. 4 に示す. 干渉縞のビジビリティーを, 干渉縞強度分布の中央の極大値と極小値から算出した. 干渉縞のビジビリティーは, He-Ne レーザーの場合 0.98, LD の場合 0.92, 赤色 LED の場合 0.40 であった. ビジビリティーを算出した位置の光路差は半波長に相当し, LED の時間的なコヒーレンス長に比べて十分短い. LED の場合にビジビリティーが劣化することが, ダブルスリット領域で LED の空間的コヒーレンスが低いことを示している.

Fig. 5 にダブルスリットの中心間隔を変えて測定した各光源のコヒーレンス度の関係を示す. LED の光源上で  $0.6 \mu\text{m}$  以上離れた領域で, LED 光源のコヒーレンス度は 0.5 以下であり, LED 光源のコヒーレンス関数の広がり ( $0.6 \mu\text{m}$  程度以下) が LED 光源の発光部の大きさ (250

$\mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$  程度)に比べて十分小さい。したがって、LED光源は広がりをもった光源、つまり、インコヒーレント光源の特性をもつことがわかった。

He-Ne レーザーと LD ではダブルスリットの間隔が変化してもコヒーレンス度の値が 0.9 以上で一定であるのに対し、LED の場合には中心間隔  $23 \mu\text{m}$  (光源上  $0.46 \mu\text{m}$ ) の場合でもコヒーレンス度が 0.6 以下で、光源上に換算したダブルスリットの間隔が広がるにつれてコヒーレンス度が低下することがわかった。

実験により、LED の空間的コヒーレンスは LD とはまったく異なることを示すことができた。

#### 4. ま と め

LED のニアフィールドにおける空間的コヒーレンスを定量的に評価するために、ダブルスリットを用いた干渉実験を行い、コヒーレンス度を測定した。同じ光学系で測定した He-Ne レーザー、LD と LED の空間的コヒーレンスを比較した結果、LED のコヒーレンス関数の広がりの方が狭いことがわかった。その結果、レーザーの安全規格で扱うことが適切ではないことを示すことができた。

本実験で用いた評価方法は、コヒーレンス関数の広がりの方が光強度分布の広がり比べて小さいときに有効である。He-Ne レーザーや LD の場合は、コヒーレンス関数の広がりと同じ程度であると予想されるため、ダブルスリットを設置する位置によってコヒーレンス度が異なる可能性がある。したがって、本実験の方法で測定したレーザー光源のコヒーレンス度は精密な値ではないが、本実験では LED とレーザー光源の差が大きいことを示すために同じ光学系を用いて測定した。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 即効型国際標準創成研究開発事業「発光ダイオード等の安全性に関する標準化」の補助を受けた。発光ダイオードについて協力いただいた日亜化学工業株式会社の山田元量氏に感謝する。

本論文の改訂にあたり、LED の空間的コヒーレンス測定に関して有益なコメントをいただいた査読者に感謝する。

また実験補助をお願いした徳島大学大学院の根宜典剛氏に感謝する。

#### 文 献

- 1) IEC60825-1: *Safety of Laser Products Part 1: Equipment Classification, Requirements and Users Guide*.
- 2) D. H. Sliney: "Laser and LED eye hazards: Safety standards," *Opt. Photonics News*, 8, No. 9 (1997) 31-37.
- 3) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 7th ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 1999) pp. 572-578.
- 4) H. Arimoto and Y. Ohtsuka: "Measurements of the complex degree of spectral coherence by use of a wave-front-folded interferometer," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 958-960.
- 5) B. J. Thompson and E. Wolf: "Two-beam interference with partially coherent light," *J. Opt. Soc. Am.*, **47** (1957) 895-902.
- 6) E. Tervonen, J. Turunen and A. T. Friberg: "Transverse laser-mode structure determination from spatial coherence measurements: Experimental results," *Appl. Phys. B Photo-phys. Laser Chem.*, **49** (1989) 409-414.
- 7) T. Asakura and H. Fujiwara: "Measurement of spatial coherence using modified Michelson stellar interferometer," *Opt. Technol.*, **1** (1969) 157-159.
- 8) A. M. Dukhovnyi, A. E. Korolev and D. I. Staselko: "Features of the measurement of the spatial coherence of laser emission by interferometric and holographic methods," *Opt. Spectrosc.*, **48** (1980) 308-312.
- 9) B. L. Anderson and P. L. Fuhr: "Twin-fiber interferometric method for measuring spatial coherence," *Opt. Eng.*, **32** (1993) 926-932.
- 10) 朝倉利光: "部分的コヒーレント光による回折現象", *光学*, **2** (1973) 2-16.
- 11) T. Asakura and I. Akamatsu: "Fresnel diffraction by a circular aperture illuminated with partially coherent light. I," *Opt. Acta*, **19** (1972) 749-763.
- 12) T. Asakura and H. Mishina: "Partially coherent Fresnel diffraction by a slit aperture. I. Theoretical analysis," *Opt. Commun.*, **7** (1973) 38-43.
- 13) T. Asakura and H. Mishina: "Partially coherent Fresnel diffraction by a slit aperture. II. Axial intensity distributions," *Opt. Commun.*, **7** (1973) 327-330.
- 14) T. Asakura: "Partially coherent Fresnel diffraction by a slit aperture. III. Fresnel diffraction patterns," *Opt. Commun.*, **8** (1973) 33-36.
- 15) T. Asakura: "Partially coherent Fresnel diffraction by a slit aperture. IV. Effect of the phase term in the coherence function," *Opt. Commun.*, **8** (1973) 186-190.